

高速列车空气动力学研究技术综述

肖京平¹⁾ 黄志祥 陈立

(中国空气动力研究与发展中心, 空气动力学国家重点实验室, 四川绵阳 621000)



肖京平, 中国空气动力研究与发展中心研究员, 博士生导师. 现任中国空气动力研究与发展中心风工程与工业空气动力学首席专家, 中国空气动力学学会风能专业委员会主任, 四川风能技术中心主任. 主要研究方向为风力机空气动力学和车辆空气动力学. 在风力机和车辆空气动力学研究方面获得了诸多有独创性的研究成果, 曾先后获得国家部委和军队科技进步一等奖三项、二等奖四项, 获得政府特殊津贴和航天基金各一次.

摘要 随着我国高速铁路的快速发展, 高速列车运行速度越来越快, 包括气动阻力、横风效应、会车效应、隧道效应和气动噪声等一系列空气动力学问题日益突出. 利用模型试验、实车测量和数值计算等不同的研究手段, 开展全面的高速列车空气动力学研究显得十分重要. 本文比较全面和系统地介绍了国内外高速列车空气动力学研究在模型试验、实车测量、数值计算等方面的技术现状和进展情况, 对今后的发展方向和内容进行了展望.

关键词 高速列车, 空气动力学, 试验, 研究技术

中图分类号: U270.11 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-13-063

REVIEW OF AERODYNAMIC INVESTIGATIONS FOR HIGH SPEED TRAIN

XIAO Jingping¹⁾ HUANG Zhixiang CHEN Li

(State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Sichuan, Mianyang 621000, China)

Abstract With the fast development of the domestic high speed railway, the very high running velocity of the trains causes a series of aerodynamic problems, including the problems of the aerodynamic drag, the cross wind effect, the train passing effect, the tunnel effect and the aerodynamic noise. It is very important to combine various investigation technologies, such as the model testing, the real train measurements and the numerical simulation to study the aerodynamics of the high speed train. This paper reviews the domestic and overseas aerodynamics studies of the high speed train, and the development directions.

Key words high speed train, aerodynamics, testing, investigation techniques

引 言

高速列车是在地面上高速运行的细长体, 由于长细比大、贴地运行, 在高速运行过程中, 出现了一系列与航空航天器不同的空气动力学问题^[1]. 这些问题主要包括: 气动阻力问题、横风效应、会

车效应、隧道效应和气动噪声等^[2-5]. 当列车运行速度超过 200 km/h 时, 气动阻力约占总阻力的 70% 左右, 运行速度超过 300 km/h 时, 气动阻力约占总阻力的 85% 以上, 列车运行越快, 气动阻力占比越高^[6-7]. 因此, 降低能耗, 提高经济性的问题就

本文于 2013-02-28 收到.

1) E-mail: xjpcardc@163.com

必然要求减少气动阻力。横侧风对列车的影响关系到运行安全性。研究表明：在强横风作用下，高速列车的气动阻力、升力和侧向力急剧增加，横向稳定性明显恶化，极易发生脱轨、倾覆事故。我国仅兰新铁路自通车至2010年因大风引起的列车脱轨、倾覆事故近40起，吹翻货车110辆，因大风引起的晚点、停运造成的损失更是无法计算^[8]。当两高速列车相向而行进行交会时，将在两车相对的表面产生强烈的瞬态压力冲击，对车体结构强度、车内乘客舒适性，甚至列车运行安全都会产生重要的影响^[9-11]，而且，随着列车运行速度的提高，这种影响和损害会更加严重。我国高速铁路穿越隧道等复杂路况正随着“四纵四横”高铁线路网的建设越来越多见。高速列车进入隧道，使得隧道内的空气产生复杂的波动过程，经隧道壁的反射并在隧道内传播，从而产生微气压波，对隧道附近的环境产生明显影响，增加高速列车气动阻力，并严重降低车内乘客的舒适度。高速列车噪声是衡量高速列车乘坐舒适性和对沿线环境影响的重要指标^[12-13]。高速列车噪声分结构噪声和气动噪声，其中气动噪声大约与速度的3次方成正比，占高速列车噪声中的主要部分。随着高速列车运行速度的提高，气动噪声必然成为高速列车研制中重点考虑的因素之一。因此，为了实现高速列车运行安全、快速、舒适和环境友好的目标^[4]，研究和解决上述空气动力学问题，具有重要的现实意义和经济价值。

研究高速列车的空气动力学问题，目前主要采用的研究手段有模型试验、实车测量、数值计算和理论分析^[11-12]。本文总结归纳了近年来国内外在高速列车空气动力学研究方面的技术进展，对于存在的问题和未来的发展进行了初步介绍。以期通过对这些技术成果的阐述，为我国高速列车空气动力学研究的深入进行提供参考和借鉴。

1 模型试验技术

高速列车模型试验研究手段主要包括风洞试验、动模型试验、水槽或水洞试验。其中，风洞试验是当前应用最广泛的研究手段之一。

对于高速列车模型试验研究，主要原理是运动相对性原理和流动相似原理。主要采用部分模拟相似条件，包括几何相似和流动相似。几何相似和运动相似较容易满足，重点考虑动力相似准则。由于模型试验过程的介质都是空气，可以认为比热比 γ 、普朗特数 Pr 和弗劳特数 Fr 等相似准则和列车实

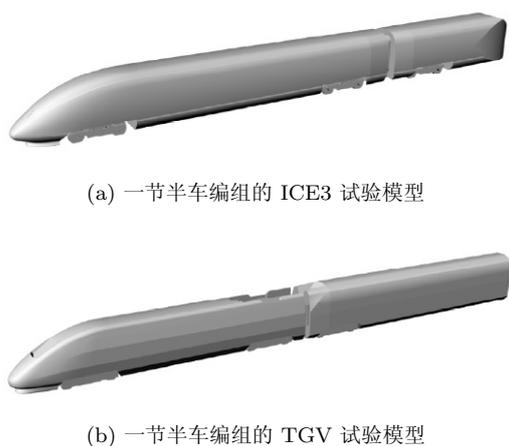
际运行时相同。模拟的相似准则主要是雷诺数 Re 相似。研究表明，流体存在两个自模拟区，即第1自模区和第2自模区。当模型与实物处于同一个自模区时，模型与实物的 Re 不必保持相等，模型试验的结果（或者做适当的修正）就可以用到实物中去^[13]。高速列车模型试验的气动力也存在自模拟区，只要试验 Re 接近 10^6 ，则模型试验的气动力试验结果随 Re 的增加变化很小，而且，试验结果可以直接用于实车^[14-15]。

根据研究目的和内容不同，高速列车模型风洞试验一般分为部件影响试验和整车性能试验。其中，部件影响试验主要考察不同头型、受电弓及受电弓导流罩、空调导流罩、外风挡、裙板、转向架导流板等对高速列车气动特性尤其是气动阻力的影响及规律，从而获得有效的气动外形优化措施尤其是减阻措施^[16-20]。整车性能试验主要考察整车设计、综合空气动力学性能是否满足设计要求、极限工况的适应范围以及研究高速列车运行对环境影响等等^[21-22]。

经过近几年的技术发展，目前，高速列车模型风洞试验的研究方法主要包括气动力测量（测力）、表面压力测量（测压）、空间与表面流场测量与显示、模型外部气动噪声测量，以及交会压力波与隧道压力波测量等^[16-25]。

在气动力测量方面，地面效应模拟的好坏直接关系到试验结果的优劣^[26-28]，因而一直都是一个关键技术。高速列车地面效应的研究方法包括理论分析、风洞试验、实车测量和数值计算。现阶段，对于高速列车的地面效应难以通过数值计算方法准确解析，必须采用实车测量方式认识地面效应在不同速度级下的变化规律和载荷特征。目前采用的边界层控制技术包括：在风洞下洞壁加装反射板，通过垫高的办法脱离风洞附面层平均位移厚度；在风洞下洞壁增加开槽、吹气或吸气装置消除附面层；通过移动带运动将固定地板转变为运动壁面从而消除附面层等^[28]。综合来看，不同的方法各有优势也存在相应的缺陷，相对而言通过吸气的方法消除附面层似乎更加简单明了。在模型测力方面，列车专用地效模拟装置、专用试验天平、多天平技术的发展使得列车编组试验能力和数据精准度得到了大幅提高^[16-22]。欧洲在DNW (Deutsh-Niederländische windkanäle) 风洞中采用1:7, 1:10, 1:15和1:25的一节头车加半节中间车的编组模型，对ICE (inter city express) 和TGV (train à grande vitesse) 高速列车在无路基、单线路堤和复线路堤等路况下开展

试验侧偏角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 状态下的气动力测量试验研究, 获得了在不同风速和风向的侧风状态下, 横向气动力和力矩最大的头车的气动特性, 以此作为 ICE 和 TGV 高速列车抗侧风安全性的依据 [29]. 试验模型如图 1 所示. 中国空气动力研究与发展中心 (以下简称气动中心) $8\text{m} \times 6\text{m}$ 大型低速风洞是国内较少能进行大比例列车模型多车编组、多天平测力试验的风洞之一. 该风洞分别进行过 6 车编组、9 车编组以及 3 车编组 (最大比例 1:6) 等试验研究, 开展最多的是 1:8 缩比的 3 车编组试验研究. 该风洞最近又发展和完善了一节头车加半节中间车编组的试验技术, 专门用于侧偏角 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内列车抗侧风安全性研究 [18-19].



(a) 一节半车编组的 ICE3 试验模型

(b) 一节半车编组的 TGV 试验模型

图 1 欧洲侧风安全性列车模型试验

在模型表面压力测量方面, 近年来, 除列车表面静态压力测量 [16-21] 的规模不断提升外, 脉动压力测试技术在列车空气动力学研究方面取得了长足的进步. 其中, 静态压力测量方面目前已在风洞试验中开展过最多同时对车身表面近 500 个测压点的静态压力测量 [19]. 列车模型表面压力测量如图 2. 脉动压力测试在风洞中的运用主要是以完成列车交会压力波测量、局部区域压力变化对车体结构影响等方面.



(a) 列车模型车身表面测压点内侧



(b) 列车模型车身表面测压点外侧

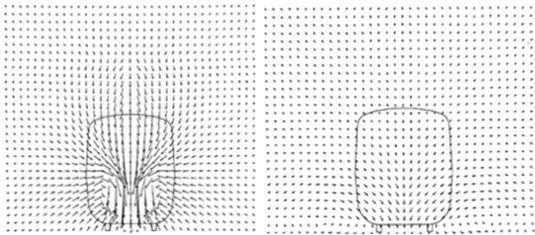
图 2 列车模型表面压力测量的测压点

在高速列车模型表面流场测量与显示方面, 目前主要采用的有流场定性显示与定量测量技术. 其中流场的定性显示技术包括外加材料显示法、光学显示法和能量注入显示法 (又称示踪法). 其中外加材料显示法包括烟线法、油膜法和丝线法. 烟线法可以研究边界层结构、分离流动和旋涡流动的机理. 油膜法主要用于显示空气介质中固体表面附近的流场情况. 丝线法是根据丝线在模型表面的流动状态判断模型表面的流场情况 (层流、湍流或分离). 在流场的定量测量方面, 目前已经发展了粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV)、七孔探针测速、激光诱发荧光 (laser induced fluorescence, LIF)、激光分子测速 (laser molecule velocimetry, LMV) 和压敏涂层测压 (pressure sensitive paint, PSP) 等技术, 它们兼有定性显示和定量测量的能力 [30]. 在高速列车模型外部流场的定性显示与定量测量方面, 气动中心具有全面的技术研究手段. 其 $4\text{m} \times 3\text{m}$ 低速风洞的空间六自由度移测装置独具特色, 可以进行尾流场的测量, 还可利用 PIV 测量技术和七孔探针测量技术对高速列车模型局部流场进行定量测量. 气动中心自行研制的单管烟流发生器和 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 水洞可以对全车或局部的流场特性进行定性显示和定量测量. 气动中心的列车模型局部流场的定量和定性测量分别如图 3 和图 4 所示.



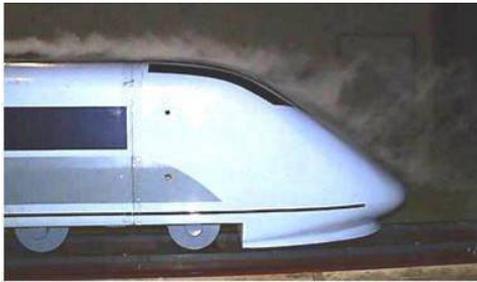
(a) 列车尾车流场测量模型

图 3 列车模型局部流场的测量

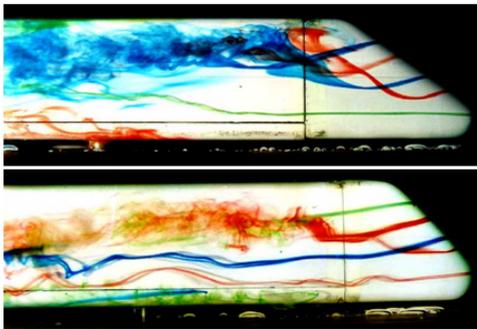


(b) 列车尾流场的测量结果 (速度分布)

图 3 列车模型局部流场的测量 (续)



(a) 列车模型表面流态的烟流显示



(b) 列车模型表面流态的水洞显示

图 4 列车模型表面流场的显示

在高速列车模型气动噪声测量方面,目前同济大学地面交通工具风洞中心代表了国内先进水平.该中心的多功能风洞能进行 1:8 缩比、3 车编组的高速列车模型的整车及头型、转向架、受电弓、受电弓导流罩、转向架裙板、风挡等部件的气动声学试验,包括列车模型在不同工况条件下的自由场传声器测试、麦克风阵列测试、表面传声器测试.目前已经为国内高速列车研制单位开展了多期高速列车模型整车及部件的气动噪声测量试验,获得了高速列车典型部件的气动声学特性.

在列车模型交会压力波和隧道压力波的测量方面,气动中心率先在国内风洞中采用空间换时间的方法利用风压板对不同头型高速列车交会压力波进行过测量,参见图 5.经过多年的研究和大量的实车测量与风洞试验对比研究表明,风压板测量结果趋势正确但数据准确性不足.隧道压力波测量目前的

主要试验方法有浅水槽法和动模型法.其中浅水槽法是根据自由表面水波运动的波高与可压缩流体运动压力的相似关系,通过测定列车模型在浅水槽中所激起的水波高度,求得空气压力变化,从而模拟高速列车过隧道的压力波动规律^[31-32].美国和日本分别于 1979 年和 1993 年采用水槽法研究了列车通过隧道的空气动力学问题,获得了很有参考价值的数据和规律^[33-35].西南交通大学^[31-32]曾利用浅水槽法模拟了时速 500 km 的高速列车过隧道的气动问题,得到了令人满意的结果.另一种研究高速列车过隧道等相对运动的方法是动模型试验.1991 年英国 Derby 铁路研究中心^[36-37]建成了用橡皮绳弹射的大尺度列车气动性能动模型试验装置.该装置的模型比例为 1:25,有 3 条长 150 m 的线路,列车模型速度可达 300 km/h,能真实模拟列车交会和过隧道的空气动力效应.日本学者 Ozawa 等^[38]在改进的动模型试验装置中,以压缩空气为动力,使得模型的发射速度达到了 100 m/s,采用全长 25 m 的导管模拟隧道,列车模型得到速度后,依靠惯性在导管内滑动,为保证其等速性,整个导管成 8° 倾角放置.荷兰^[39]研制的新型动模型发射实验装置,采用空气炮来发射列车模型,模型试验速度高达 500 km/h,隧道模型长度为 10 m.国内采用动模型法的典型代表有中南大学和西南交通大学,分别建有列车模型发射式实验装置.其中,中南大学高速列车研究中心^[13]1998 年建成的动模型试验装置是世界上最大的,由双轨组成,试验线总长 164 m,可进行 1:16 ~ 1:20 缩比,3 车编组最高运行速度 350 km/h,且可调线间距的动模型模拟试验.根据流动相似原理,通过弹射方式使列车模型在线路模型上无动力高速运行,真实再现列车交会与过隧道等空气三维非定常、非对称流动现象,以模拟两交会列车之间和列车与周围环境(地面、隧道、道旁建筑等)之间的相对运动,并真实地反映地面效应,弥补了风洞试验无法模拟的相对运动^[10-12],其试验装置如图 6.西南交通大学试验中心^[14,40]建立的压缩空气式列车模型发射装置的最大发射速度可以达到 100 m/s,列车模型轮廓尺寸可达 40 mm×60 mm×30 mm,有效运行距离为 20 m.列车模型通过压缩空气从发射装置中射出,进出隧道模型后产生气动效应,通过在隧道壁上设置的传感器记录压力和噪声的变化,通过调整模型速度、隧道阻塞比及不同形式的缓冲结构,模拟列车在不同工况下进出隧道的气动噪声和压力波测量,试验装置如图 7.



图 5 列车模型交会压力测量



(a) 列车明线交会



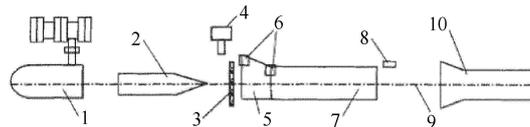
(b) 列车单车过隧道



(c) 列车隧道交会

图 6 中南大学列车动模型试验装置

值得一提的是, 目前世界上的高速列车最快运行速度超过 300 km/h, 国内上海磁悬浮列车最高运行速度达到了 430 km/h, 而且正在研制的高速列车运行速度也达到了 500 km/h. 目前国内几乎没有开



1 发射装置, 2 列车模型, 3 可视烟流发生器, 4 高速数码照相机, 5 缓冲结构, 6 压力传感器, 7 模型隧道, 8 噪声传感器, 9 定向钢丝, 10 模型回收机构

图 7 西南交通大学高速列车模型试验装置示意图

展马赫数超过 0.3 的高速列车气动特性的风洞试验研究, 主要开展的是高速列车在马赫数低于 0.3 的不可压缩流动状态下的气动特性风洞试验研究. 在低速不可压缩流动范围内, 根据 Re 相似原理, 高速列车的气动特性存在自模区, 目前开展的高速列车风洞试验研究几乎都能保证进入自模区, 当达到进入自模区的试验风速后, 气动特性随风速的增加变化很小, 因此没有进一步提高试验风速的必要.

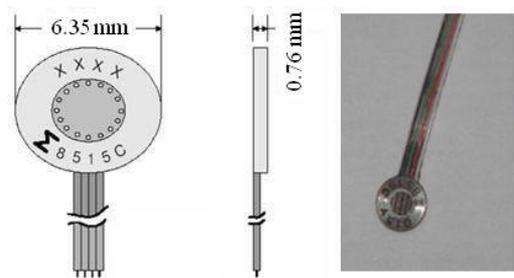
2 实车测量技术

当前, 实车测量包括列车气动阻力、车身表面脉动压力、车厢内部压力测量, 列车空调、冷却风和进排气口的气流流速与流量测量, 以及列车运行过程对周围环境和结构物产生的气动噪声、微气压波以及列车风的测量等等. 其中, 压力测量主要是列车在明线状态、隧道内交会与非交会状态下的压力测量 [41-51].

对于高速列车实车的气动阻力测量, 目前是在专用线路 (如环形线) 或营业线路上, 采用动力计法 (多为推送法, 含瞬时及平均距离间隔两种处理方式) 或溜放法试验, 测定为数众多的不同速度下基本阻力值. 按 10 km/h 左右速度间隔的合并点, 或直接用数据处理的数学方法 (如最小二乘法) 将总阻力或单位阻力处理成速度的二阶方程, 从而获得列车的气动阻力 [41].

压力和微气压波的测量主要是在高速列车车体内外侧或环境物表面 (如隧道壁面或建筑物表面) 选择合适测点, 采用不同压力传感器装置测量. 在实车压力测量方面, 目前, 由于高速列车都是采用全封闭结构, 在车体不允许破坏的情况下, 存在测点导管进入车内非常困难的现实问题. 因此, 实车表面压力测量不宜开展大量测点的测试. 为了使有限的测点布置合理, 需要遵循以下原则: (1) 由于高速列车的纵向对称性, 测压点一般布置在车身纵向对称面的一侧; (2) 测压点一般集中布置在头部和尾部等

表面压力变化较大的部位,表面压力变化较平缓的车身宜少量布点;(3) 高速列车车体强度的薄弱和重点关注部位,也应作为重点布点部位. 在实车表面脉动压力测量和车厢内部压力测量中,为了减小传感器的粘贴对测点部位流场的影响,所选传感器必须具备薄、小和轻的特点,目前采用的脉动压力传感器有诸如 8515C-15 型薄片式绝对压力传感器、85108-2 差压式脉动压力传感器和国内自主研发的拍式感压片等,参见图 8,配合 FocusII 动态信号分析仪和计算机等设备,完成测试数据的采集与处理 [43,48]. 传感器的粘贴必须平整和牢固,传感器所连测压管应与车身纵向剖面成 45° 角粘贴在表面,测压管路应在车身表面顺着来流进行平整和组合,并尽量选取车身沟、槽或缝作为走道,从而减小传感器及测压管路对测点部位流场的影响. 实车压力测量中参考压的选取是一个关键的技术问题. 对于采用以上压差传感器进行高速列车运行过程中的压力测量时,由于稳定可靠的参考压的获取存在困难,国内有学者 [49,52] 比较了采用风速管静压作为参考压、车内环境压力作为参考压和恒温密封瓶法等方法,经过实践检验,采用恒温密封瓶法获得稳定可靠参考压的效果最佳. 该方法是在车厢内部放置一个密封的玻璃瓶,将该玻璃瓶浸泡在一个盛有冰水混合物的保温桶内,玻璃瓶口用橡皮塞密封,用一玻璃小管将瓶内压力引至压力扫描阀,恒温密封瓶法参见图 9. 侧风的干扰也是实车压力测量中的一个常见问题,为了消除侧风对测试数据的干扰,目前工程上主要通过车体两侧布置对称点(一般至少 3 对),将对称点的压力差值作为衡量侧风对测试结果影响的重要依据. 另外,中南大学高速列车研究中心的学者 [46-47] 对列车实车测量的各种影响因素进行了研究,提出了诸如高速列车交会压力波测量的采样频率取 1000 Hz,滤波频率取 100 Hz 等非常具有实际指导价值的建议.



(a) 脉动压力传感器 Endevco 8515C-15



(b) 拍式感压片

图 8 压力传感器

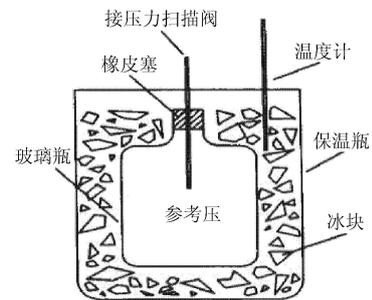


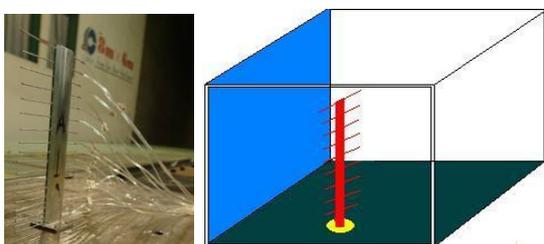
图 9 恒温密封瓶法

列车交会状态是实车压力测量的一个重点和难点工况. 其技术难点主要在于必须实时测定两列交会列车的相对速度和列车间距. 国外如日本是采用在试验列车表面打孔并安装传感器测定的方法,而我国的实车测量几乎都不允许破坏列车表面,为此,国内学者 [51] 研发了一套新型测试系统,包括红外光电测速系统、超声波测距系统,成功解决了上述工程问题.

在列车隧道空气动力效应的实测方面,日本 1975 年在山阳新干线试运行的实测过程中首次发现了微气压波现象,并在后期的新干线上进行了大量的实车试验研究,获得了隧道出口微气压波与隧道长度及道床类型的关系. 法国研究人员 [13] 对 TGV 动车组在 300 km/h 的速度通过 100 m^2 的隧道并交会的工况下进行了实车试验,得到了隧道内压力随隧道长度的变化规律. 在我国列车进一步提速及修建高速铁路客运专线迫切要求解决隧道列车空气动力效应问题的背景下,中南大学轨道交通教育部重点实验室 [45,53] 分别于 2005 年和 2007 年进行了遂渝线 200 km/h 等级有碴隧道空气动力效应实车试验(有碴轨道)及遂渝线无碴轨道隧道空气动力效应实车试验,获得了列车过隧道时车厢内、外空气压力变化,及隧道口微气压波、隧道内列车风、隧道壁面振动加速度等重要参数.

对于列车空调、冷却风和进排气口的气流流

速、流量的测量，可以采用压力耙（一根静压探针，其余为总压探针）布置在气流口，将耙上探针的压力用塑料软管引至压力扫描阀系统进行气流动压的测量，然后将动压转化为气流速度及进行流量计算，压力耙测量法如图 10。



(a) 压力耙 (b) 压力耙气流测量示意图

图 10 压力耙测量进排气口气流法示意图

对于高速列车实车的气动噪声测量，主要测量设备包括噪声测量的传声器（阵列）、实时分析声级计和测定列车运行速度的辅助设备。一般是在距离列车轨道中心一定距离的某一位置布置传声器阵列，声信号经传声器接收并放大和转换，输入计算机进行后处理^[54-55]。高速列车实车现场气动噪声测量如图 11。日本^[56]在新干线列车上进行了大量实车噪声测量研究，将高速列车运行时的噪声源分为 5 类：受电弓噪声、头部噪声、车体上部噪声（车厢连接处噪声）、车体下部噪声（转向架噪声和轮轨噪声）和结构噪声，研制出了低噪声受电弓、Z 子截面受电弓隔声板、全包大风挡、雪梨罩和车体底部吸声结构等措施，取得了很好的降噪效果，如图 12 所示。荷兰国家应用科学研究院（The Netherlands Organization For Applied Scientific Research, TNO）1996 年利用 SYNTACAN 声学阵列法，对 TGV 列车以 330 km/h 的速度运行时的噪声进行了测量，绘制了声学图像，清晰地获得了 TGV 高速列车噪声源位置和噪声分布特征。国内在高速列车气动噪声实车测量方面的研究起步相对较晚。同济大学^[54]对上海磁悬浮列车在距轨道中心 35 m 处的气动噪声进行了测量，将噪声源分为绕流声、附面层噪声和尾流噪声，获得了噪声脉冲性和间歇性的特征。2012 年 4 月，北车长春轨道客车股份有限公司和气动中心对深圳地铁 2 号线的列车车外（主要是头部）和车内的气动噪声进行了实车测量，得到了地铁列车在过隧道过程中的噪声变化规律，如图 13。

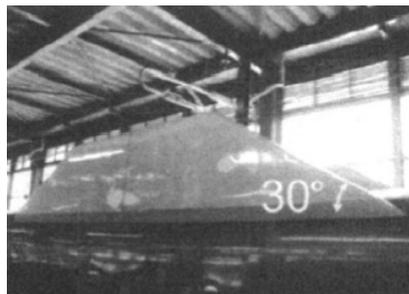


(a) 实时分析声级计 (b) 列车实车噪声测量

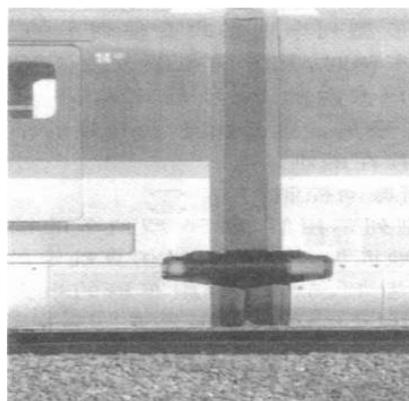
图 11 列车噪声的实车测试



(a) 低噪声受电弓



(b) 受电弓隔声板



(c) 软式全包大风挡

图 12 日本高速列车降噪措施



(a) 车头外部噪声测量 (b) 车厢内部噪声测量

图 13 深圳地铁 2 号线列车噪声测量试验

对于高速列车的列车风测量,目前可以采用超声波风速仪或热线风速仪进行测量.在大量实车测试研究的基础上,目前世界各国制定了不同的安全列车风标准.日本要求安全列车风速不大于 9 m/s ,英国的标准为不大于 11 m/s ,我国制定的《时速 200 公里新建铁路桥隧站设计暂行规定》提出站台旅客和铁道线路作业人员所能承受的列车风速不大于 14 m/s [45].

3 数值计算技术

在高速列车空气动力学的研究中,数值计算的适用范围最广.理论上,任何高速列车空气动力学问题都可以进行数值计算的方法加以解决.近年来数值模拟技术的发展主要体现在以下方面:专业数值计算软件的开发和应用,数值计算方法的改进和完善,包括网格技术的发展等.

在高速列车空气动力学数值计算软件方面,国内高校和科研院所主要采用自主研发的计算分析软件或采用从国外引进的大型 CFD (computational fluid dynamics) 商用软件.国内自主研发的、专门针对高速列车空气动力学的计算软件的典型代表有气动中心开发的 WS3D (wide screen 3D) 气动计算软件,中南大学研发的相对运动数值模拟软件、三维近尾流场数值积分软件和三维流场数值计算软件,西南交通大学开发的基于一维可压缩非稳态流理论和特征线方法的隧道压力波软件 [52]. 国外引进的大型商用 CFD 计算软件的典型代表有 FLUENT, CFX, PHOENICS, STAR-CD, ANSYS 和 CFdesign 等 [57]. 值得一提的是,相同气动现象的数值计算结果经常随着计算软件和计算方法的不同依然存在较大差异,需要模型试验或实车测量结果进行验证 [6].

在高速列车流动问题的数值计算中,若以列车

宽度为特征长度,当列车速度达到 300 km/h ,其流场雷诺数达到了 10^7 ,流场处于湍流状态.湍流流动问题的数值计算至今是一个没有得到很好解决的问题.目前在对湍流的数值模拟方面采用的方法主要分为 3 类:(1) 直接模拟.用三维非稳态的 Navier-Stokes 方程对湍流进行直接的数值计算.(2) 大涡模拟.用非稳态的 N-S 方程直接模拟大尺度涡,不直接计算小尺度涡,小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑.(3) Reynolds 时均方程加湍流模型.把时间平均值的概念用于列车周围流场动力学控制方程中,则流体动力学控制方程中的瞬时流动参数可由其平均值和脉动值来表示.该方法是目前在工程上进行流场数值计算应用最为广泛的方法 [58].

当前的流动数值计算方法很多,其中通用性较好,且应用比较广泛的是有限差分法、有限元法、有限体积法和边界元法等.其中有限差分法在复杂几何边界的应用中存在一定的欠缺,有限元法更适用于流体与固体相耦合的问题,有限体积法在离散方程的解决方面存在优势而成为目前应用最广泛的方法,边界元法在黏性 N-S 方程的求解应用中受到很大限制.因此,每种计算方法都有各自的适用范围,目前国内外还没有一个通用性最好的方法问世,这也应成为数值计算研究的一个努力方向.

高速列车流场数值计算的网格包括结构化网格和非结构化网格,但由于求解区域的复杂性,主要采用非结构化网格.近年来,在高速列车复杂流场的数值计算中,出现了将结构化网格和非结构化网格结合形成混合网格,既对复杂计算区域具有可自适应性,又能节省计算资源和时间 [59]. 为应对列车流场数值模拟中复杂且突出的相对运动问题,如列车交会和过隧道问题,采用的网格生成方法有动网格方法和滑移网格方法.动网格生成网格的频率太高,并且时间步长限制太严,需耗费大量的时间,因而一般采用滑移网格,主要包括针对列车交会流场的非对称滑移网格法和列车过隧道的滑移网格法.滑移网格采用公共区重叠或滑移面技术 [10]. 在计算网格的数量方面,国内以气动中心为代表的高速列车流场数值计算网格的数量已经超过了 2.6 亿个,使得包括受电弓和转向架等外形及流场的复杂区域实现了网格的精细化划分,为高速列车整车和关键部位的精细化数值模拟奠定了基础.

针对不可压缩流 N-S 方程的数值求解,存在两个关键问题:一是对流项的离散问题和压力梯度的离散问题.对于对流项的离散问题,应用最广泛的计

算格式是中心格式、二阶迎风和 QUICK 格式, 对于压力梯度的离散问题, 目前应用最广泛的主导方法是压力修正法, 其中最具代表性的是 SIMPLE 算法及其修正算法 SIMPLER, SIMPLEC 算法。

在对列车的湍流流动模拟中, 常用的湍流模型有 Spalart-Allmaras 单方程模型、 $k-\varepsilon$ 双方程模型、 $k-\omega$ 双方程模型和 Reynolds 应力模型等, 目前应用最广泛的湍流模型是 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[10,60]。

另外, 对于速度超过 350 km/h, 马赫数超过 0.3 的高速列车空气动力特性的数值计算, 目前国内开展的研究相对较少。其中毕海权等^[60]采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和 SIMPLE 算法对运行速度 500 km/h 的磁悬浮列车的三维、黏性、可压缩和非稳态的绕流流场进行了数值计算, 得到了自然风对磁悬浮列车气动特性的影响规律。对于两列车交会时相对速度超过 300 km/h、马赫数超过 0.3 的情况下的列车外部流场数值计算, 目前国内外基本都是采用有限体积法和动网格技术进行求解。1995 年日本学者 Fujii, Ogawa^[61]和 Hwang, Lee^[62]采用有限差分法求解列车交会过程的三维可压缩 Euler/Navier-Stokes 方程, 得到了列车交会过程中压力分布和气动力的变化。毕海权等^[63], 田红旗等^[64]等采用有限体积法和动网格技术对列车交会的三维可压缩流场进行了数值模拟。邱英政^[57]采用 Reynolds 时均方程的模拟方法和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 对高速列车近壁流场采用壁面函数法和动网格技术, 分别对考虑空气可压缩性与不可压缩性的影响进行了比较, 得出了二者的最大误差可达 24.6% 的结论。

4 展 望

我国目前已经拥有全世界运营里程最长的高铁线路, 而且在线运营的轮轨式高速列车运营速度超过了 300 km/h, 为世界第一。我国未来的高铁发展规划是, 将继续建造以“四纵四横”为框架的高铁线路, 不断扩展高铁运营里程。研制更安全、更快速、更舒适和对环境影响更小的高速列车将是我国高铁的发展趋势。就空气动力学领域而言, 列车空气动力学的发展趋势主要是:

(1) 进一步提高列车运行安全性和舒适性。一是从高速列车车体设计 (降低交会压力波和隧道内微气压波及气动噪声等) 两个方面研究增强高速列车运行安全性的措施。二是基于高速列车运行环境越来越复杂也越来越恶劣的实际, 必须加大特殊路况下的安全问题研究等。在风洞试验研究中, 开展

高速列车在上述特殊路况下的模拟, 如地面效应模拟^[28]、高架桥梁^[65]和高路堤^[66]的模拟, 并开展相应特殊路况下的安全性措施研究显得十分重要。

(2) 进一步提高试验研究水平。随着高速列车运行速度不断提高, 必须重点开展: ①进一步提升大比例模型风洞试验模拟速度。随着运行速度的提高, 高速列车周围的流场将会出现从低速不可压缩流动向高速可压缩流动的变化, 为了更真实模拟高速列车运行的实际工况, 提高风洞试验模拟速度存在实际的需求。目前国内能开展的 1:8 缩比、3 车编组高速列车模型风洞试验的速度最大为 250 km/h, 已经难以满足 350 km/h 及今后更高速度的高速列车模型风洞试验需求; ②发展高速列车减阻技术。包括研发气动阻力更低的高速列车新头型 (参见图 14), 以及开展包括车顶、车身侧面和车底尤其是转向架周围空腔在内的气动外形优化减阻措施研究; ③结合模型风洞试验、动模型试验和实车测量, 开展高速列车气动噪声和微气压波的测量技术, 以及降噪^[56]和降压措施的研究, 提高高速列车乘坐舒适性以及减小对周围环境的影响。



图 14 高速列车低阻头型

(3) 进一步提高数值模拟能力。深入开展列车运行环境周边流场研究, 发展和提高并行计算能力, 探索数学模型建立的新方法和技巧, 研究新的网格生成技术, 拓展和完善流动数值计算方法的通用性和适用性, 加强实车测试、风洞试验与数值计算的结合力度, 从而提高高速列车流动问题数值计算的能力。

5 结 语

本文比较全面、系统地介绍了国内高速列车空气动力学的研究技术进展, 综合分析了国内各研究单位在上述不同方面的特色和技术优势包括模型试验、实车测量、数值计算等方面的现状。根据我国高铁快速发展的趋势, 提出了在涉及提高高速列车运

行安全性和舒适性等核心技术方面,在高速列车空气动力学研究的设备能力和技术以及在提高数值计算能力建设等方面需要不断完善和突破的关键领域。期望通过国内广大空气动力学科技工作者的努力,为我国高速轨道交通的发展提供高水平的气动研究服务。

参 考 文 献

- 田红旗, 高广军. 270 km·h⁻¹ 高速列车气动力性能研究. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 14-18 (Tian Hongqi, Gao Guangjun. The analysis and evaluation on the aerodynamic behavior of 270 km·h⁻¹ high speed train. *China Railway Science*, 2003, 24(2): 14-18 (in Chinese))
- Schetz JA. 高速列车空气动力学. 力学进展, 2003, 33(3): 404-423 (Schetz JA. Aerodynamics of high speed trains. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(3): 404-423 (in Chinese))
- 伊腾顺一. 改善空气动力学性能, 实现新干线的高速. 国外铁道车辆, 2002, 39(3): 9-12 (Yi Tengshunyi. Improve the pneumatic dynamics performance and realize high speed on shinkanson line. *Foreign Rolling Stock*, 2002, 39(3): 9-12 (in Chinese))
- 冈本熊. 日本新干线列车技术发展趋势. 国外铁道车辆, 2003, 40(4): 4-7 (Gang Benxiong. Trend of development of shinkanson train technology in Japan. *Foreign Rolling Stock*, 2003, 40(4): 4-7 (in Chinese))
- Horiuchi M. E955 型新干线高速试验列车 (FASTECH360Z) 概述. 国外铁道车辆, 2008, 45(3): 12-17 (Horiuchi M. General description of the type E955 shinkansen high speed test train (FASTECH360Z). *Foreign Rolling Stock*, 2008, 45(3): 12-17 (in Chinese))
- 梁习锋, 田红旗, 邹建军. 动力车纵向气动力风洞试验及数值计算. 国防科技大学学报, 2003, 25(6): 101-105 (Liang Xifeng, Tian Hongqi, Zou Jianjun. The wind tunnel test and numerical simulation of longitudinal aerodynamic force of the traction car. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, 25(6): 101-105 (in Chinese))
- 蔡国华. 高速客车模型气动特性实验研究. 实验流体力学, 2007, 21(4): 27-31 (Cai Guohua. An experimental research on aerodynamic characteristics of the high-speed passenger model. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(4): 27-31 (in Chinese))
- 刘庆宽, 杜彦良, 乔富贵. 日本列车横风和强风对策研究. 铁道学报, 2008, 30(1): 82-88 (Liu Qingkuan, Du Yanliang, Qiao Fugui. Train-crosswind and strong wind countermeasure research in Japan. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(1): 82-88 (in Chinese))
- 李明. 高速列车空气动力学性能风洞试验研究方法. [硕士论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2001 (Li Ming. Aerodynamic performance test research methods of high-speed train in wind tunnel. [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001 (in Chinese))
- 田红旗. 列车空气动力学. 第 1 版. 北京: 中国铁道出版社, 2007
- 贺德馨. 风工程与工业空气动力学. 第 1 版. 北京: 中国国防工业出版社, 2006
- 田红旗. 列车交会空气压力波研究及应用. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 83-89 (Tian Hongqi. Research and applications of air pressure pulse from trains passing each other. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2004, 1(1): 83-89 (in Chinese))
- 周丹. 长大隧道、隧道群空气动力效应算法研究及应用. [博士论文]. 长沙: 中南大学, 2007 (Zhou Dan. Research on the long tunnel and tunnel group' aerodynamic algorithm and its application. [PhD Thesis]. Changsha: Central South University, 2007 (in Chinese))
- 王学英, 骆建军, 李伦贵. 高速列车模型试验装置及相似特征分析. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 20-24 (Wang Xueying, Luo Jianjun, Li Lungui. Model experiment system for high-speed trains and analysis of its similarity. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(1): 20-24 (in Chinese))
- 王学英, 高波. 高速列车进出隧道空气动力学研究的新进展. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 83-87 (Wang Xueying, Gao Bo. New development of the aerodynamics of high-speed trains passing in and out tunnels. *China Railway Science*, 2003, 24(2): 83-87 (in Chinese))
- 陈立. “蓝箭”高速机车风洞试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2001 (Chen Li. Wind tunnel test report of “Blue Rocket” high-speed train model. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2001 (in Chinese))
- 黄志祥, 陈立. 新一代高速列车风洞试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2009 (Huang Zhixiang, Chen Li. Wind tunnel test report of new style of high-speed train. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2009 (in Chinese))
- 黄志祥, 陈立. CRH3 动车组风洞试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2009 (Huang Zhixiang, Chen Li. Wind tunnel test report of EMU CRH3. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2009 (in Chinese))
- 黄志祥. 新一代高速动车组 CRH3-380A 风洞试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2010 (Huang Zhixiang. Wind tunnel test report of new style EMU CRH3-380A. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2010 (in Chinese))
- 黄志祥. 时速 500 公里试验列车空气动力学风洞试验报告 (1:8 模型). 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2011 (Huang Zhixiang. Wind tunnel test report of aerodynamics of 500 km/h testing train(1:8 model). Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2011 (in Chinese))
- 黄志祥, 陈立. 磁浮列车模型 8 米 × 6 米风洞试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2009 (Huang Zhixiang, Chen Li. The 8 m × 6 m wind tunnel test report of maglev train model. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2009 (in Chinese))
- 黄志祥, 陈立. 大风对集装箱车气动性能影响风洞试验报告. 绵

- 阳, 气动中心低速空气动力研究所, 2010 (Huang Zhixiang, Chen Li. The wind tunnel test report for the large wind affection on aerodynamic characteristics of container train. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2010 (in Chinese))
- 23 田红旗, 梁习锋. “中华之星” 高速列车综合空气动力性能研究. 机车电传动, 2003, (5): 40-45 (Tian Hongqi, Liang Xifeng. Study of comprehensive aerodynamic performance for “China Star” high speed EMU. *Electric Drive for Locomotives*, 2003, (5): 40-45 (in Chinese))
- 24 王学英, 高波, 赵文成等. 高速列车进出隧道空气动力学特征模型实验分析. 流体力学实验与测量, 2004, 18(3): 73-78 (Wang Xueying, Gao Bo, Zhao Wencheng, et al. Aerodynamics character model experiment analysis of high-speed train going through tunnel. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, 18(3): 73-78 (in Chinese))
- 25 赵文成, 高波, 王学英等. 高速列车通过隧道时压力波动过程的模型试验. 现代隧道技术, 2004, 41(6): 16-19 (Zhao Wencheng, Gao Bo, Wang Xueying, et al. Analysis of the pressure wave variation generated by a high-speed train passing through a tunnel. *Modern Tunnelling Technology*, 2004, 41(6): 16-19 (in Chinese))
- 26 Baker CJ, Jones J, Lopez-Calleja F. Measurements of the cross wind forces on trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(7): 223-227
- 27 Suzuki M, Tanemoto K. Aerodynamic Characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1-2): 143-147
- 28 战培国. 国外车辆风洞及气动模拟测试技术综述. 见: 第八届全国风工程和工业空气动力学学术会议论文集, 银川, 2010 (Zhan Peiguo. A review of overseas vehicle wind tunnel and aerodynamic simulation testing technique. In: The 8th National Wind Engineering and Industrial Aerodynamic Conference, Yinchuan, 2010 (in Chinese))
- 29 European Standard. Railway applications—Aerodynamics-part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment, BSEN14067-6, 2009
- 30 据娟, 高波. 高速铁路隧道内空气流场的流动显示. 铁道建筑, 2003, (10): 50-52 (Ju Juan, Gao Bo. Visualization of air flow field in the high-speed railway tunnel. *Railway Engineering*, 2003, (10): 50-52 (in Chinese))
- 31 高品贤, 余南阳, 雷波. 隧道空气压力波浅水槽拖动模型试验的实时检测. 铁道学报, 2000, 22(3): 43-46 (Gao Pinxian, Yu Nanyang, Lei Bo. Real time test on air pressure wave in tunnel by shallow water table modeling experiment. *Journal of the China Railway Society*, 2000, 22(3): 43-46 (in Chinese))
- 32 余南阳, 雷波, 许志浩等. 高速列车隧道压力波浅水槽模拟试验研究. 西南交通大学学报, 2004, 26(2): 52-55 (Yu Nanyang, Lei Bo, Xu Zhihao. Shallow water simulation experiment and study of pressure waves produced when a high speed train enters a tunnel. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 26(2): 52-55 (in Chinese))
- 33 Suo M, Jacobs P.J. Hydraulic analogy study of waves in tunnels. PB173657, 1966
- 34 Mills JM, Wilson DG. Study by hydraulic analogy of the passage of high-speed trains through tunnels. PB176922, 1967
- 35 木川田一弥, 森井宣治. 对超高速列车在隧道内运行时压力变化的实验研究. 隧道译丛, 1994, (50): 1-9 (Kikawada Ichiya, Morii Sunji. The experiment investigation of pressure change of super high-speed train running in tunnel. *Translator Reference of Tunnel*, 1994, (50): 1-9 (in Chinese))
- 36 Johnson T. 1/25 scale moving model tests for the TRANSAERO project TRANSAERO symposium (transient aerodynamics railway system optimizations). Paris, France, 1999
- 37 PoPe CW. The simulation of flows in railway tunnels using a 1/25th scale moving model facility. In: Proceeding of the 7th ISAVVT, London, 1991
- 38 Ozawa S, Tsukamoto K, Maeda T. Model experiments on devices to reduce pressure wave radiated from a tunnel. RTRI, Japan, 1976
- 39 Dewolf WB, Demmenie EAFA. A new test facility for the study of interacting pressure waves and their reduction in tunnels for high speed trains. In: Proc. 9th ISAVVT, Aosta Valle, 1997
- 40 关永久. 高速列车在隧道内会车过程的气动特性研究. [硕士论文]. 成都: 西南交通大学, 2010 (Guan Yongjiu. Aerodynamics research on two high-speed trains passing through in tunnel. [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010 (in Chinese))
- 41 黄问盈, 杨宁清, 黄民. 列车基本阻力的思考. 中国铁道科学, 2000, 21(3): 44-57 (Huang Wenyong, Yang Ningqing, Huang Min. Ponderation on railway train basic resistance. *China Railway Science*, 2000, 21(3): 44-57 (in Chinese))
- 42 韩锬, 田红旗. 客运专线隧道空气动力学实车测试技术的研究与应用. 中南大学学报, 2008, 38(2): 326-332 (Han Kun, Tian Hongqi. Research and application of testing technology of aerodynamics at train-tunnel entry on special passenger railway lines. *Journal of Central South University*, 2008, 38(2): 326-332 (in Chinese))
- 43 陈立. 磁浮车表面脉动压力测量试验报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力研究所, 2008 (Chen Li. The report of pulsant surface pressure measurement on maglev-vehicle. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2008 (in Chinese))
- 44 田红旗, 卢执中. 列车交会压力波的影响因素分析. 铁道学报, 2001, 23(4): 17-20 (Tian Hongqi, Lu Zhizhong. Influence of various factors on air pressure pulse from trains passing by each other. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23(4): 17-20 (in Chinese))
- 45 刘堂红, 田红旗, 金学松. 隧道空气动力学实车测量研究. 空气动力学学报, 2008, 26(1): 42-46 (Liu Tanghong, Tian Hongqi, Jin Xuesong. Experimental study of full-scale train on aerodynamics in tunnel. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(1): 42-46 (in Chinese))
- 46 梁习锋, 陈燕荣. 列车交会空气压力波测量的影响因素. 中南大学学报, 2004, 35(5): 810-814 (Liang Xifeng, Chen Yanrong.

- Influential factors of measuring air pressure pulse produced by passing trains. *Journal of Central South University*, 2004, 35(5): 810-814 (in Chinese))
- 47 杨明智, 袁先旭, 熊小慧等. 广深线第六次提速列车交会压力波实测研究. *实验流体力学*, 2008, 22(2): 56-60 (Yang Mingzhi, Yuan Xianxu, Xiong Xiaohui, et al. Experiment study of pressure pulse caused by trains passing each other on Guangzhou-Shenzhen railway for the sixth speed-up. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(2): 56-60 (in Chinese))
- 48 陈立. 上海磁浮高速列车空气压力波和列车风测量报告. 绵阳, 气动中心低速空气动力学研究所, 2004 (Chen Li. The report of air pressure wave and train wind measurement on Shanghai maglev-vehicle. Mianyang, Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, 2004 (in Chinese))
- 49 梁习锋. 实车表面空气压力分布试验技术研究. *铁道学报*, 2002, 24(3): 95-98 (Liang Xifeng. Research on test technique to measure air pressure distribution on external surface of real train. *Journal of the China Railway Society*, 2002, 24(3): 95-98 (in Chinese))
- 50 张斌, 梁习锋. 准高速列车表面压力分布测量实车测量研究. *铁道车辆*, 2000, 38(10): 14-16 (Zhang Bin, Liang Xifeng. Test and research with cars for measurement of surface pressure distribution on qua si-high speed trains. *Rolling Stock*, 2000, 38(10): 14-16 (in Chinese))
- 51 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展. *交通运输工程学报*, 2006, 6(1): 1-9 (Tian Hongqi. Study evolvement of train aerodynamics in China. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(1): 1-9 (in Chinese))
- 52 刘堂红, 田红旗. 不同外形列车过隧道实车测量的比较分析. *中国铁道科学*, 2008, 29(1): 51-55 (Liu Tanghong, Tian Hongqi. Comparison analysis of the full-scale train tests for trains with different shapes passing tunnel. *China Railway Science*, 2008, 29(1): 51-55 (in Chinese))
- 53 梁习锋, 武传田. “中华之星”号高速列车车厢内部空气压力试验研究. *电力机车与城轨车辆*, 2003, 26(5): 15-16 (Liang Xifeng, Wu Chuantian. Air pressure test in the carriage of “China Star” high-speed EMU. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2003, 26(5): 15-16 (in Chinese))
- 54 赵跃英, 盛胜我, 刘海生等. 磁悬浮列车行驶噪声的测试与分析. *同济大学学报*, 2005, 33(6): 768-771 (Zhao Yueying, Sheng Shengwo, Liu Haisheng. Measurement and analysis of noise from running maglev systems. *Journal of Tongji University*, 2005, 33(6): 768-771 (in Chinese))
- 55 张海濱, 蒋伟康, 万泉. 城市轨道交通列车噪声辐射特性的试验研究. *振动与冲击*, 2010, 29(11): 83-86 (Zhang Haibin, Jiang Weikang, Wan Quan. Experimental investigation on noise radiation characteristics of an urban transit train at moderate and low speeds. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(11): 83-86 (in Chinese))
- 56 Kurita T. 高速试验列车 FASTECH360 的降噪成果. *国外铁道车辆*, 2010, 1(1): 14-18 (Kurita T. Efforts for noise reduction on FASTECH360 high speed test train. *Foreign Rolling Stock*, 2010, 1(1): 14-18 (in Japanese))
- 57 邱英政. 高速列车交会压力波数值模拟计算与测试研究. [硕士论文]. 北京: 北京交通大学, 2007 (Qiu Yingzheng. The numerical and experimental investigation on crossing air pressure pulse by passing high-speed train. [Master Thesis]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- 58 谭深根. 侧风下高速列车气动性能分析. [硕士论文]. 成都: 西南交通大学, 2008 (Tan Shengen. The analys of aerodynamic characteristics of the high-speed train under sidewind. [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008 (in Chinese))
- 59 王东屏. CFD 数值仿真建模技术研究及其在高速动车组中的验证. [博士论文]. 大连: 大连交通大学, 2006 (Wang Dongping. Technology research of creating CFD models and its verification in high speed train. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2006 (in Chinese))
- 60 毕海权, 雷波, 张卫华. 自然风对高速磁浮列车气动特性的影响. *中国铁道科学*, 2007, 28(2): 65-70 (Bi Haiquan, Lei Bo, Zhang Weihua. Effects of natural wind on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train. *China Railway Science*, 2007, 28(2): 65-70 (in Chinese))
- 61 Fujii K, Ogawa T. Aerodynamics of high speed trains passing by each other. *Computer & Fluids*, 1995, 24(8): 897-908
- 62 Hwang J, Lee D. Numerical simulation of flow field around high speed trains passing by each other. American Institute of Aeronautics & Astronautics, USA, 1999
- 63 毕海权, 雷波, 张卫华. 高速磁浮列车会车压力波数值计算研究. *空气动力学学报*, 2006, 24(2): 213-237 (Bi Haiquan, Lei Bo, Zhang Weihua. Numerical study of the pressure load caused by high-speed passing maglev trains. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2006, 24(2): 213-237 (in Chinese))
- 64 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算. *铁道学报*, 2001, 23(3): 18-22 (Tian Hongqi, He Dexin. 3-D numerical calculation of the air pressure pulse from two trains passing by each other. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23(3): 18-22 (in Chinese))
- 65 董亚男, 徐宇工, 邱英政. 高速列车在桥梁上行驶时空气动力特性的数值模拟研究. *铁道机车车辆*, 2008, 28(3): 14-18 (Dong Yanan, Xu Yugong, Qiu Yingzheng. Numerical simulation of the aerodynamic behaviors of a high-speed train traveling on the bridge. *Railway Locomotive & Car*, 2008, 28(3): 14-18 (in Chinese))
- 66 周丹, 田红旗, 鲁赛军. 大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响. *交通运输工程学报*, 2007, 7(4): 6-9 (Zhou Dan, Tian Hongqi, Lu Zhaijun. Influence of strong crosswind on aerodynamic performance of passenger train running on embankment. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(4): 6-9 (in Chinese))